DOI:10.11931/guihaia.gxzw202210060

氮肥施用对岩溶区石灰土种植火龙果品质的影响

陈婷，谭艳芳，陆树华*，李冬兴，李健星，陆芳

（广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所， 广西 桂林 541006）

摘　要：为探究岩溶区石灰土条件下火龙果的氮肥施用水平对其果实品质的影响，模拟岩溶区石灰土土壤环境开展盆栽试验，以“台湾大红”火龙果为实验材料，在磷(P)和钾(K)分别为0.216、0.324 kg 基础上，设置 4 种施氮水平（CK、T1、T2、T3），测定 21 个果实品质指标，比较不同施氮水平的火龙果品质差异，同时利用主成分分析法对 11 个外观品质指标进行了综合分析。结果表明：（1）施氮可提高果实可溶性糖含量及可溶性固形物含量，降低蛋白质含量及膳食纤维含量，高氮处理（T3）与其他处理差异显著；随施氮量增加，果实可滴定酸含量、维生素 C 含量呈先升后降趋势，而固酸比随施氮量呈先降后升的趋势；高氮水平明显提高了果实的纵横径、果形指数及单果重。（2）施氮处理降低了火龙果果实 N 含量，提高了 P 含量，各处理间的 N、P 含量差异显著；果实 K 含量随着施氮量的增加而提高；施氮增加了果实 B 含量，降低了果实 Cu 含量；不同处理果实 Mn、Fe、Ca、Mg 含量高低排序为 T3＞T1＞CK＞T2；Zn 含量随施氮量呈先降低后增加的趋势。（3）高氮水平处理的主成分综合评价得分最高，说明选择桂林岩溶区棕色石灰土种植火龙果时，再辅以一定量的 P、K 肥基础上，高氮处理更有利于提高火龙果品质，在实际生产中需根据种植园的土壤肥力状况进行适当调整。

关键词：氮肥，岩溶石灰土，火龙果，果实品质，矿质营养

中图分类号：Q945　　　　　　　　　　**文献标识码**：A

Effects of nitrogen fertilizer application on the quality of pitaya planted in calcareous soil in karst area

CHEN Ting, TAN Yanfang, LU Shuhua*, LI Dongxing, LI Jianxing, LU Fang

(*Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain*, *Guangxi Institute of Botany*, *Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: Effects of different nitrogen fertilizer application rates on fruit quality of pitaya under the condition of calcareous soil in karst area were discussed in order to promote the growth, development and quality improvement of pitaya. The ‘Taiwan Dahong’ pitaya in 3-year-old were used as the experiment material. Based on 0.216 kg of phosphorus (P) and 0.324kg of potassium (K), four nitrogen application levels (CK, T1, T2, T3) were setted. 21 fruit quality indexes were determined, and the quality differences of pitaya with different nitrogen application levels (CK,T1,T2,T3) were compared. At the same time, 11 appearance quality indexes were

基金项目：广西自然科学基金（2019GXNSFBA245097）；广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题资助（KDL202103）；广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金 （18-A-03-02）；广西植物研究所基本业务费项目（桂植业 23007）。

第一作者： 陈婷（1989-），硕士，助理研究员，主要从事恢复生态学研究，(E-mail)chent@gxib.cn。

***通信作者**：陆树华，博士，研究员，研究方向为石漠化治理与生态产业培育，(E-mail)lushuhua13@163.com.。

comprehensicely analyzed by principal component analysis. The results were as follows: (1) Compared with the control, nitrogen application could increase the soluble sugar content and soluble solids of fruit content, reduce the protein content and dietary fiber content, and the high nitrogen treatment (T3) was significantly different from other treatments. With the increase of nitrogen application rate, the titratable acid content and vitamin C content of fruit increased first and then decreased, while the solid-acid ratio decreased first and then increased with the increase of nitrogen application rate, and the high nitrogen treatment(T3) was significantly higher than other treatments. High nitrogen level significantly increased the fruit vertical and horizontal diameter, fruit shape index and single fruit weight. (2) Compared with the control, nitrogen application treatment reduced the N content of pitaya fruit and increased the P content, and the N and P contents of each treatment were significantly different. The K content of fruit increased with the increase of nitrogen application rate, and T3 treatment was significantly higher than other treatments. Nitrogen application increased fruit B content and decreased fruit Cu content. The contents of Mn, Fe, Ca and Mg in different treatments were ranked as T3 > T1 > CK > T2. The content of Zn decreased first and then increased with the increase of nitrogen application rate. (3) The principal component comprehensive evaluation score of the high nitrogen level treatment was the highest, indicating that when selecting brown calcareous soil in Guilin karst area to grow pitaya, supplemented by a certain amount of P and K fertilizer, high nitrogen treatment was more conducive to improving the quality of pitaya. In actual production, it is necessary to make appropriate adjustments according to the soil fertility status of the plantation.

Key word: nitrogen fertilizer, karst calcareous soil, pitaya, fruit quality, mineral nutrition

火龙果（*Hylocereus* spp.）属仙人掌科（Cactaceae）多年生攀援性植物，原产于中美洲热带沙漠地区，后传入越南等东南亚国家。20 世纪 90 年代初引入中国台湾种植，随后逐渐推广到海南、福建、广东、广西等地。火龙果果实含有丰富的糖、蛋白质、维生素、膳食纤维、矿质元素等，具有很高的营养保健价值，是一种广受人们喜爱的水果。近年来，我国火龙果产业发展迅猛，种植面积和总产量均超过越南，位列世界第一，显示了极强的发展潜力。广西是我国火龙果种植面积最大的省区，引领着我国火龙果产业的发展（陆树华等，2018a，b；王飞跃等，2020）。

广西是我国岩溶主要分布区，也是我国石漠化治理的重点区域之一。在岩溶石漠化地区开展生态治理与生态产业培育，是石漠化治理行之有效的措施。经过二十多年的试验和推广，火龙果目前已发展成为广西西南岩溶石山区重要的农业支柱产业，在脱贫攻坚和石漠化防治方面得到社会的广泛认可(陆树华等，2018b)。前期试验示范表明，火龙果在岩溶地区富钙偏碱的环境条件下生长旺盛，显示其对岩溶环境具有极强的适应能力。然而，岩溶区普遍土层浅薄、土壤总量较少，保水保肥性能较差，需要外源添加氮肥等养分，才能够维持火龙果的生产力。迄今为止，针对火龙果在岩溶石灰土环境条件下需肥特性的研究极少，已有研究更多集中在酸性土壤上，由于石灰土与酸性土在理化性质方面有较大差异，研究结果并不能直接指导岩溶区的火龙果种植。

氮素是果树生长发育所必需的大量矿质元素，在果树的器官建成、物质代谢以及生理生化过程中发挥着重要的作用，主要对植物生长速率、形态建成以及树体养分的运输和分配等方面产生影响（Duarte et al., 1993）。施氮量是决定植物生长及养分吸收分配的重要因素之一，适当的施氮量能及时适量的为果树生长发育提供营养物质，并不断地改善根际土壤的理化性状，为果树健壮生长创造良好的环境条件，以提高产量及品质（劳秀荣，2001）。氮素匮缺会导致树体枝梢发育不良、贮藏营养不足，而过量盈余不仅会降低伦晚脐橙（Brunetto et al., 2017）、葡萄柚（He et al., 2003）、芒果（Nguyen et al., 2004）等果实的品质，还会增

加植株病害风险以及环境负荷，降低果树对氮的有效利用率（Qin et al., 2016）。Alleyne 等（1997）在研究氮肥施用量对黑莓品质的影响时发现，施用过量氮肥对果实品质并没有不良影响，可能是因为果树品种不同，其自身的的需肥特性及对土壤肥力的耐受力也不一样。

研究表明，火龙果根系浅、持续结果能力强、需肥量大，对土壤氮素较为敏感（程玉等，2018）。火龙果对氮的需求量较大，以火龙果果实含水量 85%计算，每收获 100 kg 鲜果需带走 225 g 纯氮（李莉婕等，2021）。火龙果全年可自然成花结果 12~15 批次，具有显著的重叠性，花芽萌发、枝条生长及开花坐果期重叠进行，使得各器官营养竞争十分激烈（梁桂东等，2018），对氮素的需求量可能与其他果树存在差异。石灰性土壤作为岩溶地区典型岩溶土壤，具有碳酸钙含量高、pH 值较高、涵养水肥能力差、土壤养分（如土壤中的有机质与氮素等）极易漏失等特点（蒋忠诚等，2014），容易引起施肥量大但肥效不足的结果。目前，岩溶区火龙果种植户多凭经验进行施肥，缺乏可参考的施氮量，导致产量不稳定、果实品质差、商品性不好等现象。因此，探索经济高效和环境友好的最佳施氮量成为岩溶区火龙果产业可持续发展的关键。

为此，本研究以广西主栽火龙果品种“台湾大红”为试验材料，设置了岩溶石灰土条件下不同氮肥施用水平的盆栽控制试验，探讨添加磷、钾肥恒定的基础上，不同施氮量对石灰土栽培火龙果营养成分的影响，同时，对火龙果生产实践中较为常见的氮肥施用水平应用效果进行验证，以期为岩溶区石灰土火龙果合理施肥提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于桂林市雁山区广西植物研究所火龙果种植基地（110°17′ E、25°01′ N），该地属于中亚热带季风气候，海拔约 180 m，年降雨量 1 900 mm，年平均日照约 1 550 h，年平均气温为 19 ℃（张中峰等，2012）。

1.2 试验材料

选择长势一致、结果枝条数量一致、无病虫害、生长正常的 3 年生“台湾大红”火龙果苗作为研究材料，苗高约 120 cm，由广西植物研究所提供。2021 年 2 月，设计了一种试验用盆栽工具—“一种火龙果专用盆栽架”，采用直径约 30 cm、高约 35 cm 的塑料花盆作为底盆，盆中立一个支架作为桩，在每个盆（桩）种植 3 株火龙果。

试验土壤为采自桂林岩溶区的棕色石灰土，基本理化性状为: pH 7.56，有机质 42.91 $g·kg^{-1}$，全氮 2.19 $g·kg^{-1}$，全磷 0.67 $g·kg^{-1}$，全钾 7.3 $g·kg^{-1}$，速效钾 60.69 $mg·kg^{-1}$，交换性钙 26. 55 mol(1/2 Ca^{2+}) $·kg^{-1}$，田间持水量 28.9%。根据全国第二次土壤普查养分分级标准，该土壤为碱性土，有机质含量为一级，全氮含量为一级，全磷含量为三级，全钾含量为五级，速效钾含量为四级。土壤采集后，去除沙砾和根系后，装塑料花盆备用，每盆用土重量约 13.50 kg。

试验用肥料：氮肥为新疆天运化工有限公司生产的尿素（N≥46%）；磷肥为湖北金正大肥业有限公司生产的过磷酸钙（P_2O_5≥16 %）；钾肥为湖北中农中加国际贸易股份有限公司生产的硫酸钾（K_2O≥50 %）。

1.3 试验设计

根据李兴忠等（2012）的实验，在碱性土壤条件下，火龙果全生育期所需 N、P、K 比例约为 1:1:1.5，按每 667 m^2 施用 N（24 kg）、P（24 kg）、K（36 kg）计算，即每盆（桩）火龙果施放纯氮约 0.216 kg(3 株/桩)，纯磷约 0.216 kg(3 株/桩)，纯钾约 0.324 kg(3 株/桩)。本试验设置 3 个不同 N 水平，P、K 各固定 1 个水平，共 4 个处理（CK、T1、T2、T3），

即 CK 为不施氮肥，T1 为 0.108 kg，T2 为 0.216 kg，T3 为 0.324 kg，各处理 P、K 分别为 0.216、0.324 kg。施肥时根据纯氮、纯磷、纯钾用量换算成每桩火龙果的尿素（N≥46%）、过磷酸钙（P_2O_5≥16 %）、硫酸钾（K_2O≥50 %）的含量。即 CK、T1、T2、T3 的尿素（N ≥46 %）施用量分别为 0、0.352、0.705、1.056 kg，各处理的磷肥（16%）、钾肥（50%）分别为 1.350、0.648 kg。

采用单因素进行处理设置，每个处理栽种“台湾大红”火龙果 1 盆（3 株/盆），设置 3 个重复，共 12 盆总计 36 株。每年分 2 次施肥，氮肥、磷肥、钾肥总量的 50%作基肥，50%作追肥，第 1 次施肥在 3 月上旬进行；第 2 次施肥在 6 月中旬进行。在塑料花盆开挖深度控制在 5~10 cm、宽 5~8 cm 的环形沟，按试验处理分次将肥料均匀撒施在沟内，施肥后与土壤混匀并覆土，灌透水 1 次。除施氮量不同以外，其他管理措施相同。

1.4 测定指标及方法

于 2021 年 8 月（盛果期）采集火龙果成熟果实，每株采集大小中等、无病虫害火龙果 3~5 个于保鲜袋中带回实验室处理，测定纵径、横经、果形指数、单果重、Vc、可滴定酸、蛋白质、膳食纤维、可溶性糖、可溶性固形物、N、P、K、Ca、Mg、Fe、B、Mn、Cu、Zn 等指标。测试方法为：单果重使用电子天平（0.01 g）测定；果实纵横径使用数显游标卡尺（精确度 0.01 mm）；计算果形指数，果形指数=纵径/横径；Vc 含量用 2,6-二氯靛酚滴定法（GB5009.86-2016）；可滴定酸用滴定法（GB/T 12456-2008）；膳食纤维含量用酶重量法（GB 5009.88-2014）；可溶性糖含量用 3,5 -二硝基水杨酸比色法（NY/T 2742-2015）；可溶性固形物含量用折射仪法（GB/T12295）测定果实中心部位。N 含量及蛋白质含量用凯氏定氮法；P 含量用钼锑抗比色法；K 含量用原子吸收分光光度法；Ca、Mg 、Fe、B、Mn、Cu、Zn 含量用硝酸 - 氢氟酸-高氯酸消煮，电感耦合等离子体质谱法（GB 5009.268-2016）。

1.5 数据分析

采用 Excel 进行数据统计，采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对火龙果品质指标的影响

由表 1 可知，T2 处理下的果实纵径、横经、果形指数、单果重最低，除果形指数外，T2 处理下其他指标均显著低于其他处理（P＜0.05）。T3 处理下的单果重显著高于其他处理（P＜0.05）。各处理的果形指数无显著差异（P＞0.05）。

由表 2 可知，T3 处理下可溶性固形物、可溶性糖、固酸比最高，可滴定酸、维生素、蛋白质、膳食纤维含量最低。可溶性固形物、可溶性糖含量随施 N 量的增加呈上升趋势，且 T3 的可溶性固形物含量显著高于其他处理（P＜0.05）；固酸比随施 N 量的增加呈现先降后升的趋势，T3 显著高于其他处理（P＜0.05）；维生素 C 含量与可滴定酸含量随施 N 量的增加呈现先增后降的趋势，可滴定酸含量在各处理间差异显著（P＜0.05）；T1 处理下的维生素 C 含量与其他处理差异显著；与 CK 相比，施 N 处理的蛋白质含量均呈现下降趋势，T1、T2、T3 之间差异显著；膳食纤维含量随施 N 量的增加呈下降趋势，CK 与 T1 显著高于其他施 N 处理（P＜0.05）。

表 1 施用氮肥对火龙果果实性状的影响

Table 1 Effect of nitrogen fertilizer application on fruit characters of pitaya

处理 Treatment	果实纵径 Vertical diameter (mm)	果实横径 Transverse diameter (mm)	果形指数 Shape index (%)	单果重 Single fruit weight (g)
CK	79.24ab	106.16a	1.34a	321.90bc
T1	75.28b	100.65ab	1.34a	352.47b
T2	67.34bc	89.46bc	1.33a	293.80d
T3	82.09a	119.95a	1.46a	384.85a

注：每列不同字母表示不同处理之间差异显著（P＜0.05）。下同

Note: Different letters in each column indicate significant differences between different treatments (P＜0.05). The same below.

表 2 施用氮肥对火龙果果实品质的影响

Table 2 Effect of nitrogen fertilizer application on fruit quality of pitaya

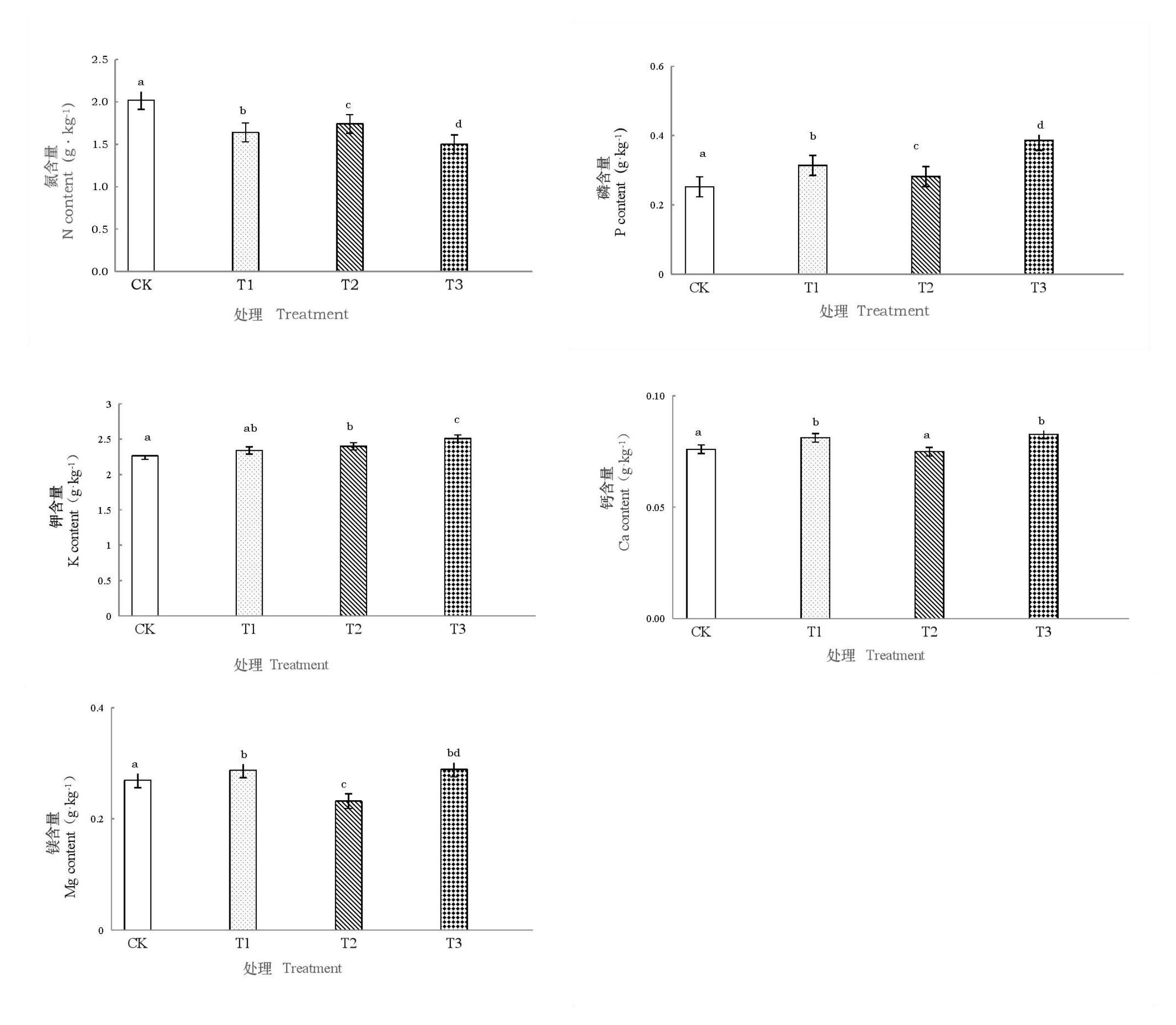
处理 Treatment	可溶性固形物 Total soluble solids (%)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	可滴定酸 Titratable acid (%)	固酸比 Solid acid ratio	维生素 C Vitamin C ($g\cdot kg^{-1}$)	蛋白质 Protein ($g\cdot kg^{-1}$)	膳食纤维 Dietary fiber (%)
CK	18.2b	9.17c	1.52b	11.95b	4.13b	12.6a	18.41a
T1	18.48b	10.3b	1.98a	9.33b	5.27a	10.3c	18.35a
T2	18.88b	13.6a	1.44c	13.09b	4.26b	10.9b	15.59b
T3	21.43a	13.8a	0.73d	29.42a	4.02b	9.4d	12.71c

2.2 不同氮肥处理对火龙果矿质常量元素和微量元素含量的影响

由图 1 可知，CK 处理下 N 含量最高，为 2.02 $g\cdot kg^{-1}$；T3 处理下 P、K、Ca、Mg 含量最高，分别为 0.39、2.51、0.083、0.29 $g\cdot kg^{-1}$；与 CK 相比，其他处理的 N 含量降低了 13.9 %~25.7 %，P、K 含量分别增加了 11.9 %~53.2%、3.3 %~10.8%；T2 的 Ca 含量较 CK 降低 1.4%，T1、T3 的 Ca 含量则分别增加了 6.7%、8.6%；T2 的 Mg 含量较 CK 降低了 13.9%，T1、T3 的 Mg 含量则分别增加了 6.7%、7.2%。方差分析结果表明，与 CK 相比较，其他处理降低了火龙果果实 N 含量，提高了 P 的含量，各处理间的 N、P 含量差异显著（P＜0.05）；果实 K 含量随着施氮水平的提高而增加，T3 处理显著高于其他处理（P＜0.05）；T1、T3 处理的 Ca 含量显著高于 CK（P＜0.05），T2 的 Mg 含量显著低于其他处理（P＜0.05）。

由图 2 可知，CK 处理下 Cu 含量最高，为 0.59 $mg\cdot kg^{-1}$；T3 处理下 Mn、Fe、Zn 含量最高，分别为 0.91、3.29、2.83 $mg\cdot kg^{-1}$；T2 处理下 B 含量最高，为 3.70 $mg\cdot kg^{-1}$。与 CK 相比，B 含量在其他 3 种处理下均有所增加，Cu 的变化趋势则相反；T2 处理的 Mn、Fe、Cu、Zn 含量最低。方差分析结果表明，与 CK 相比较，T1、T2、T3 的果实 B 含量均得到了提高，

T2 与其他处理差异显著（$P<0.05$）；T1、T2、T3 显著降低了火龙果果实 Cu 含量，且各处理间差异显著（$P<0.05$）。施氮处理中，果实 Mn、Fe、Cu、Zn 含量的高低顺序均为 T3＞T1＞T2，且 T2 显著低于其他处理（$P<0.05$）。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同处理下火龙果常量元素的含量

Fig.1 Macroelement contents of pitaya in different treatments

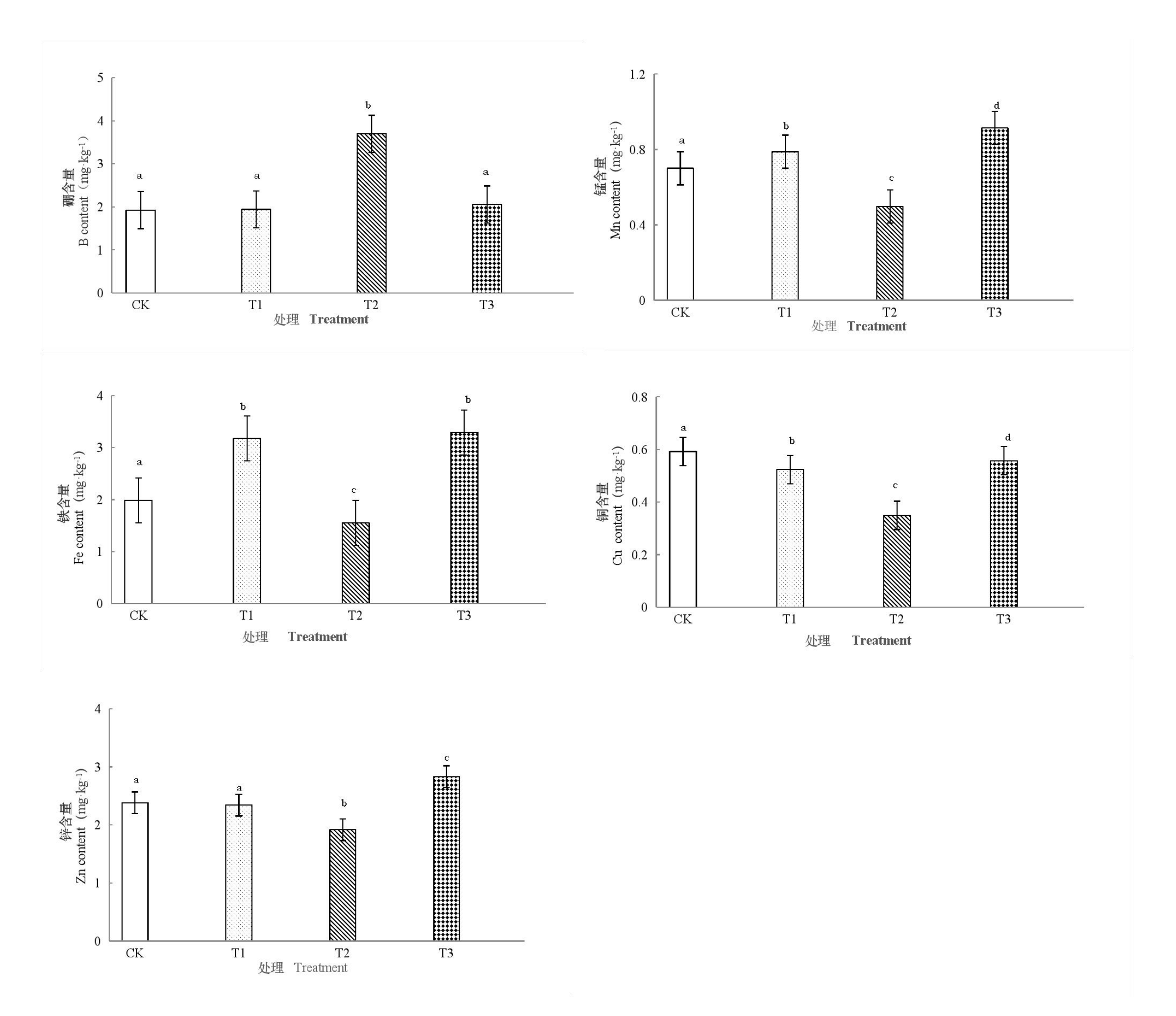


图 2 不同处理下火龙果微量元素含量

Fig.2 Trace element contents of pitaya in different treatments

2.3 火龙果果实品质主成分分析及综合评价

果实品质决定性地影响了其在消费者心中的欢迎程度，果实外观与食用品质共同决定果实的综合品质，大小、形状等外在因子决定其外在感官品质， 糖、有机酸等食用因子决定果实的营养价值。本研究利用 SPSS 22.0 对火龙果的 11 项品质指标进行主成分分析，由表 3 可知，提取出的 3 个主成分，特征值均大于 1.000，累积方差贡献率达 87.48 %，包含了绝大部分原始数据信息，应取前 3 个主成分作为火龙果品质评价的分析指标。第 1 主成分的方差贡献率为 55.42%，贡献率最大的是果形指数，其次是蛋白质、横径、维生素 C、可溶性固形物、可溶性糖；第 2 主成分的方差贡献率为 18.56%，在单果重、膳食纤维、可溶性固形物上有较大载荷值；第 3 主成分的方差贡献率为 13.49%，在固酸比、纵径、可滴定酸上有较大载荷值。

根据表 4 的因子得分系数矩阵及其对应的主成分，可以计算出每个主成分因子得分，其得分表达式如下：

F_1=-0.151X_1-0.104X_2+0.160X_3+0.086X_4+0.121X_5+0.115X_6+0.078X_7+0.139X_8+0.109X_9-0.153X_{10} -0.094X_{11}；

F_2=0.178X_1+0.120X_2-0.003X_3+0.396X_4+0.302X_5+0.098X_6+0.228X_7-0.054X_8-0.353X_9+0.053X_{10} +0.061X_{11}；

F_3=-0.008X_1-0.484X_2-0.001X_3-0.020X_4-0.047X_5-0.070X_6+0.348X_7+0.036X_8+0.085X_9+0.188X_{10}+0.517X_{11}。

式中: X_1~X_{11} 分别表示果实横径、纵径、果形指数、单果重、可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、维生素 C、膳食纤维、蛋白质、固酸比等 11 个品质指标；F_1~F_3 分别表示各主成分得分。

结合主成分因子得分公式并以主成分方差贡献率为权重，构建火龙果品质综合评价得分（F）函数，公式如下。$F=0.55F_1+0.19F_2+0.13F_3$。

根据综合评价得分函数可计算出不同处理火龙果品质的综合得分及其排序，综合得分越高说明该品种综合品质越好。由表 5 可知，综合得分排名最高的是 T3，说明 T3 处理的综合品质相对较好。

表 3 火龙果品质指标的主成分载荷矩阵、特征值和方差贡献率

Table 3 Principal component load matrix, eigenvalue and variance contribution rate of the quality index of pitaya

品质指标 Quality index	主成分载荷值 Principal component load value		
	1	2	3
横径 Transverse diameter	-0.918	0.363	-0.012
纵径 Vertical diameter	-0.637	0.246	-0.718
果形指数 Shape index	0.973	-0.007	-0.002
单果重 Single fruit weight	0.525	0.808	-0.030
可溶性固形物 Total soluble	0.740	0.617	-0.069
可溶性糖 Soluble sugar	0.699	0.199	-0.104
可滴定酸 Titratable acid	0.475	0.465	0.516
维生素 CVitamin C	0.847	-0.110	0.054
膳食纤维 Dietary fiber	0.665	-0.721	0.126
蛋白质 Protein	-0.935	0.108	0.279
固酸比 Solid acid ratio	-0.575	0.124	0.767
特征值 Eigenvalues	6.097	2.042	1.484
方差贡献率 Variancecontribution（%）	55.424	18.563	13.488
累计方差贡献率 Cumulative contribution rates（%）	55.424	73.987	87. 475

表 4 因子得分系数矩阵表

Table 4 matrix of factor score coefficient

品质指标 Quality index	各成分因子得分系数 Score coefficient of each component factor		
	1	2	3

横径 Transverse diameter	-0.151	0.178	-0.008
纵径 Vertical diameter	-0.104	0.120	-0.484
果形指数 Shape index	0.160	-0.003	-0.001
单果重 Single fruit weight	0.086	0.396	-0.020
可溶性固形物 Total soluble	0.121	0.302	-0.047
可溶性糖 Soluble sugar	0.115	0.098	-0.070
可滴定酸 Titratable acid	0.078	0.228	0.348
维生素 CVitamin C	0.139	-0.054	0.036
膳食纤维 Dietary fiber	0.109	-0.353	0.085
蛋白质 Protein	-0.153	0.053	0.188
固酸比 Solid acid ratio	-0.094	0.061	0.517

表 5 因子得分与综合得分

Table 5 Factor score and comprehensive score

处理 Treatment	F_1	F_2	F_3	F	总排名 Comprehensive score rank
CK	-0.30	0.18	-0.16	-0.28	3
T1	-0.41	0.08	0.17	-0.15	2
T2	-0.18	-0.29	-0.04	-0.51	4
T3	0.89	0.03	0.02	0.95	1

3 讨论

3.1 石灰土条件下氮肥施用的火龙果产量效应

氮不仅是植株生长发育的重要物质基础，也是影响果实外观品质及营养品质的重要因素，合理施氮是提高植物果实品质的重要途径（谭梦怡等，2021）。火龙果多批次结果，施肥量与各批次的品质指标相关性具有一定差异（陈丽美等，2019）。单果重和果径能反映果实大小，是影响果实外观、商品品级的重要外在品质指标。本研究中，以石灰土种植的火龙果，其成熟期果实的产量指标显示，各施氮水平对火龙果果形指数无显著影响，但氮肥施用量增加到一定量时，其纵横径相应增加，进而也提高了果实单果重。岩溶区富钙偏碱的环境条件下，石灰土的供氮能力偏低，氮素参与植物体内蛋白质、核酸和叶绿素等化合物等一系列化合物的合成，具有促进植物生长发育、提高作物生产力等作用。这表明，不论是酸性土还是石灰土，氮都是火龙果获得高产的重要肥力因素，适量施氮能促进火龙果营养生长、花芽分化、光合作用等，对产量的形成也有积极的意义。

3.2 石灰土条件下氮肥施用的火龙果品质效应

火龙果果实含有丰富的营养成分和功能性物质，王飞跃等（2020）将可溶性糖、蛋白质

和可滴定酸等指标作为评价火龙果品质的重要指标。固酸比作为衡量果实糖、酸含量的综合指标，是影响果实风味的关键因素，比值越高风味口感更适合，直接影响其商品价值（王立娟等，2020）。合理施氮能促进果实的生长发育，显著提高果实可溶性固形物和维生素 C 含量，降低可滴定酸含量（张亚飞等，2017）。氮的供给直接影响植物光合产物和氨基酸的合成，植物可通过光合作用和糖代谢合成蔗糖，并提高果实中的糖含量（徐洪超等，2022）。此外，蔗糖代谢酶活性受到氮肥水平的激发，会提高可溶性糖的含量（刘娜等，2015）。本研究表明，以石灰土种植的“台湾大红”火龙果，其可溶性糖、可溶性固形物含量均随着施氮量的增加而增加，可滴定酸含量则随施氮量增加而降低，T3 处理下可溶性固形物含量、可溶性糖含量、固酸比均比 CK 有所增加，可滴定酸含量则呈现下降，这与李润唐等的研究结果一致（李润唐等，2010）。各氮肥处理下可溶性固形物含量也随着施氮量的增加而增加，可能与可溶性固形物主要是由可溶性糖构成有关（袁野等，2009）。胡文峰研等研究发现氮肥施用能极显著升高葡萄果实可溶性糖含量，降低总酸度，对固酸比有促进作用（胡文峰等，2023）。本研究中，除低氮水平外，固酸比整体随着施氮水平增加比值升高，说明适宜的施氮量可以调节果实的固酸比，提高风味品质。本研究中，T1、T2 的维生素 C 含量都高于 CK，T3 处理低于 CK，随着供氮水平的提高呈现先升高后降低的趋势，与杨治平等研究发现增施氮肥能够提高果树维生素 C 含量，但施肥量过高反而不利于维生素 C 的积累的结果相似（杨治平等，2007）。推测其原因可能是植物果实的硝酸盐积累量与氮肥施用量成正相关关系，当氮肥施用量高时，维生素 C 与亚硝酸盐的反应直接导致维生素 C 的损耗（段云晶等，2016）。本研究中，膳食纤维含量随着施氮量的增加而降低，可能是因为膳食纤维主要以木质素、多聚糖及含氮物质为主，氮肥配施促进了植株氮的吸收和向果实的运转，相应的减少了无效碳水化合物（膳食纤维）在果实中的积累（徐国华等，1997）。

3.3 石灰土条件下氮肥施用的火龙果果实元素响应

果实中氮、磷、钾含量的高低及其比例会影响果实的品质。氮影响果实的色泽与成熟度及果实中蛋白质的含量；磷的含量可调控果实中淀粉、糖以及多种维生素的含量；钾能改善果实品质，增强抗病虫害的能力。施用氮肥可以明显提高果实 N、P、K 元素的吸收量及积累（柴仲平等，2011）。李兴忠等（2012）研究表明，火龙果果实中的 N、P、K 含量与氮肥、磷肥和钾肥用量关系密切。本研究中，施氮处理下果实 P、K 含量均高于 CK，与上述研究相似，但施 N 处理的果实 N 含量及蛋白质含量反而低于 CK，可能是因为石灰性土壤的偏碱性特点容易发生氨挥发，造成了一定的氮损失（LI et al., 2017）。也可能与干物质积累分配及养分吸收规律有关，氮肥施用过量会使氮同化物向植物营养器官转移和积累，降低向生殖器官的分配，影响果实 N 含量的积累，继而影响蛋白质含量（王新等，2023）。氮肥施用对果树根系中中微量元素吸收具有明显的促进作用，继而影响果实中微量元素的含量（马宗桓等，2018）。此外，矿质元素间也存在一定的协同作用或拮抗作用。李丹萍等研究发现，在磷钾用量一致的条件下，施用氮肥显著提高了百香果果实 Ca 含量，但显著降低了果实 Mg、Cu、Fe、Zn 含量（李丹萍等，2022）。番茄果实中 P 含量与 Mg、Fe、Zn 含量均呈显著正相关，Mg 含量与 Fe、Zn 含量均呈显著正相关（金宁等，2020）。本研究结果显示，石灰土种植条件下，在定量磷、钾肥基础上，高氮处理下 Ca、Mg 含量最高，施氮处理下果实 B 的含量均高于对照，在中氮水平含量最高；果实 Mn、Fe、Cu、Zn 在中氮水平含量最低，在高氮水平含量逐渐增加且达到最高值。果实 Ca 元素缺失易导致植株生理性病害，Mg 元素是植物叶绿素的重要组成成分，Mn 元素直接参加光合作用的放氧过程，Fe 元素影响氧化还原系统与光合磷酸化过程，Cu 元素参与植物体内的氮素代谢，Zn 元素促进光合作用中二氧化碳的固定（陆景陵，1994）。火龙果品质的形成依赖于光合作用产生的有机物质，T3 处理的果实 Ca、Mg、Mn、Fe、Cu、Zn 含量同比均最高，说明氮肥施用较多的 T3 处理能够促进火龙果光合作用所需矿质元素的运输，从而提升果实中的矿物质含量。与

廉晓娟等发现，氮肥量高的处理，番茄果实的 Ca、Mg 含量较高，其次为 Zn、Fe、Mn、Cu 的研究结果类似（廉晓娟等，2020）。果实 B 含量与 Mn、Fe、Cu、Zn 含量呈现明显的负相关关系，说明在本研究条件下，多数矿质元素间存在协同作用，少数矿质元素存在拮抗作用，火龙果果实对矿质元素的吸收和累积存在交互效应。

主成分分析方法可将原来彼此间具有相关性的较多指标简化为彼此间相对独立或相关性较小的几个具有代表性的指标，保留绝大部分的原始信息，比单一评价更快捷、准确，同时避免性状间的相关性对评价结果的影响（叶霞等，2022）。本试验结果表明，T3 处理的综合得分最高。

综上所述，本研究虽然探明了氮肥施用对石灰土种植火龙果果实品质的影响，但氮素的释放特征及其输入后在土壤中长期缓释机制尚不清楚，需要展开更加长期、系统的定位监测进行论证，以全面了解火龙果园土壤养分、树体养分和果实品质的变化规律。

4 结论

在石灰土种植条件下，不同施氮量显著影响火龙果的品质指标及矿质元素含量。施氮可提高果实可溶性糖含量及可溶性固形物含量，降低蛋白质含量及膳食纤维含量；果实可滴定酸含量及维生素 C 含量均随施氮量增加呈先升后降趋势，固酸比则反之；高氮水平提高了果实纵横径、果形指数、单果重。在火龙果矿质元素方面，施氮能提高果实 P、K、Ca、B 含量，降低 N、Zn、Cu 含量；高氮水平促进了果实 Mg、Mn、Fe 含量的积累。通过主成分分析对所测指标进行有效降维，并对其进行综合评分，评分结果与果实品质基本一致，说明综合评分具有较好的代表性。综合评价得分最高的为 T3 处理，说明该处理下可提高火龙果的品质，增加其商品性和经济效益。本研究相关结论基于桂林市郊的石灰土开展，在不同岩溶区由于其土壤肥力背景存在差异，因此，需根据种植园土壤理化性状和经营目标，制定当地适宜的施肥和管理措施。

参考文献：

陈丽美，李小英，岳学文，等，2019. 竹炭与有机肥混施对火龙果产量和品质影响及其改土作用[J]. 生态环境学报，28（11）：2231-2238. [CHEN LM, LI XY , YUE XW, et al., 2019. Effect of mixed application of bamboo charcoal and organic fertilizer on yield and quality of red Pitaya and soil amelioration [J]. Ecol Environ Sci, 28(11): 2231-2238.]

柴仲平，王雪梅，孙 霞，等，2011. 氮磷钾不同配比滴灌施肥对灰枣中矿质元素含量的影响[J]. 节水灌溉，（5）：23-26. [CHAI ZP, WANG XM, SUN X, et al., 2011. Influence of N, P, K proportion in fertilizing through drip irrigation on nineral elements content in Jujube Fruit[J]. Water Sav Irr, (5): 23-26.]

程玉，徐敏，熊睿，等，2020. 滴灌条件下氮肥用量对火龙果果实的影响[J]. 热带生物学报，11（1）：25-30. [CHENG Y, XU M, XIONG R, et al., 2020. Effects of different nitrogen treatments on Pitaya fruit growth and quality under drip Irrigation [J]. Chin J Trop Crops, 11(1): 25-30.]

段云晶，王康才，李柯，等，2016．氮素形态配比对桔梗硝酸盐和亚硝酸盐动态积累及营养品质的影响[J]．西北植物学报，36(4)：738-744．[DUAN YJ, WANG KC, LI K, et al., 2016. Nitrate and nitrite accumulation and nutritional quality of Platycodon grandi florum with different nitrogen forms and ratios [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 36(4): 738-744.]

胡文峰，周旋，黄粤林，等，2023．氮肥减量配施包膜尿素对阳光玫瑰光合特性、产量及品质的影响[J]．华北农学报，38（2）：179-187．[HU WF, ZHOU X, HUAGN YL, et al., 2023. Effects of nitrogen reduction combined with coated urea on photosynthetic characteristics, yield and quality of Shine muscat[J]. Acta Agric Boreal-Sin, 38(2): 179-187.]

蒋忠诚，罗为群，邓艳，等，2014．岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]．地球学报，35（5）：535-542．[JIANG ZC, LUO WQ, DENG Y, et al., 2014. The leakage of water and soil in the Karst peak cluster depression and its prevention and treatment [J]. Acta Geosci Sin, (5): 535-542.]

金宁，肖雪梅，郁继华，等，2020. 不同品种番茄果实矿质元素含量评价[J]．甘肃农业大学学报，55（4）：76-84.[JIN N, XIAO XM, YU JH, et al., 2020. Evaluation on mineral element contents in fruits of different tomato varieties[J]. J Gansu Agric Univ, 55(4):76-84.]

劳秀荣，2001．果树施肥手册[M]．北京：中国农业出版．[LAO RX, 2001. Handbook of fruit tree fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press.]

梁桂东，黄黎芳，廖以金，等，2018．火龙果周年成花结果观测及产期调节策略分析[J]．中国南方果树，47(5)：45-49．[LIANG GD, HUANG LF, LIAO YJ, et al., 2018. Investigation of all year around flowering & fruiting habit of Pitaya and strategy of pick time regulating [J]. S Chin Fruits, 47(5): 45-49.]

刘娜，宋柏权，闫志山，等，2015．氮肥施用量对甜菜蔗糖代谢关键酶和可溶性糖含量的影响[J]．中国农学通报，31（27）：183-189. [LIU N, SONG BQ, YAN ZS, et al., 2015. Effect of nitrogen application on the content of soluble sugar and key enzyme activities in sugar metabolism of sugar beet [J] . Chin Agric Sci Bull, 31(27): 183-189.]

李润唐，张映南，张伟国，等，2010．土壤营养状况对火龙果产量和品质的影响[J]．福建果树，（1）：37-39．[LI RT, ZHANG YN, ZHANG WG, et al., 2010. Effects of soil nutrient status on the yield and quality of pitaya[J]. Fujian Fruit Tree, (1): 37-39.]

李兴忠，范建新，邓仁菊，等，2012．氮磷钾肥配施对火龙果产量及品质的影响[J]．贵州农业科学，40（2）：56-60．[LI XZ, FAN JX, DENG RJ, et al., 2012. Effects of different N,

P and K combination on yield and quality of pitaya [J]. Guizhou Agric Sci, 40(2): 56-60.]

李丹萍，寸待泽，李晶，等，2022. 不同氮钾肥用量对百香果生长、品质及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料，（12）：123-132. [LI DP, CUN DZ , LI J, et al., 2022. Effects of different nitrogen and potassium dosage on growth, quality and yield of passion fruit[J]. Soils Fert Sci Chin, (12): 123-132.]

李莉婕，孙长青，黎瑞君，等，2021. 不同供氮水平下火龙果果实发育模拟研究[J]. 贵州农业科学，49（1）：132-139.[LI LJ, SUN CQ, LI RJ, et al., 2021. Simulation study on fruit development of *Hylocereus polyrhizus* under different nitrogen level[J]. Guizhou Agric Sci, 49(1): 132-139.]

廉晓娟，王艳，梁新书，等，2020. 不同施肥水平对设施番茄中微量元素吸收的影响[J]. 江苏农业科学，48（16）：197-200.

陆树华，谭艳芳，黄甫昭，等，2018a. 4个火龙果品种在岩溶石山区的栽培表现及生态适应性研究[J]. 广东农业科学，45（4）：51-56. [LU SH, TAN YF, HUANG FZ, et al., 2018a. Culture performance and eco-adaptation of four varieties of dragon fruit in Karst rocky mountainous area [J]. Guangdong Agric Sci, 45(4): 51-56.]

陆树华，谭艳芳，李冬兴，等，2018b. 广西岩溶地区火龙果生态产业的培育及其发展[J]. 广西科学，25（5）：524-531. [LU SH, TAN YF, LI DX, et al., 2018b. The cultivation and development of dragon fruit eco-industry in karst area of Guangxi [J] . Guangxi Sci, 25(5): 524-531.]

陆景陵，1994. 植物营养学（上册）[M]. 北京：中国农业大学出版社：69-73. [LU JL, 1994. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press: 69-73.]

马宗桓，陈佰鸿，胡紫靦，等，2018. 施氮时期对干旱荒漠区蛇‘龙珠’葡萄叶片糖代谢及果实品质的影响[J]. 干旱地区农业研究，36（6）：145-152. [MA ZH, CEHN BH, HU ZG, et al., 2018. Effects of nitrogen application on leaf sugar metabolism and fruit quality of‘Cabernet Gernischt’grape in arid desert region [J]. Agric Res Arid Areas, 36(6): 145-152.]

谭梦怡，李华东，王鸿浩，等， 2021. 大红火龙果果实养分积累量动态变化及其相关性[J]. 南方农业学报，52（7）：1816-1825. [TAN MY, LI HD, WANG HH, et al., 2021. Dynamic changes and correlation of nutrient accumulation in the fruit of red pitaya[J]. J S Agric, 52(7): 1816-1825.]

王飞跃，刘子琦，李渊，等，2020. 石漠化治理区火龙果果实品质评价[J]. 西南农业学报，

33（4）：867-874. [WAGN FY, LIU ZQ, LI Y, et al., 2020. Evaluation of pitaya fruit quality in rocky desertification control area [J]. SW Chin J Agric Sci, 33(4): 867-874.]

王新，董承光，余渝，等，2023. 基于临界氮浓度的南疆滴灌棉花氮营养诊断及产量估算[J]. 应用生态学报，34(3)：688-698. [WANG X, DONG CG，Yu Y，et al., 2023. Nitrogen nutrition diagnosis and estimation of seed cotton yield based on critical nitrogen concentra tion for drip irrigation cotton in Southern Xinjiang, China[J]. Chin J Appl Ecol, 34(3): 688-698.]

王立娟，蔡汝翠，肖图舰，等，2020. 火龙果果实发育过程中糖和酸积累及相关酶活性分析[J]. 中国南方果树，49（4）：39-43. [WANG LJ, CAI RC, XIAO TJ, et al., 2020. Analysis of sugar and acid accumulation and the related enzyme activities during the development of pitaya fruit [J]. S Chin Fruits, 49(4): 39-43.]

徐国华，沈其荣，潘文辉，等，1997. 叶面营养对黄瓜生物效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报，（1）：36-42. [XU GH, SHEN QR, PAN WH, et al., 1997. Biological effects of foliar fertilizers on cucumber plant[J]. J Plant Nutr Fert, (1) : 36-42.]

徐洪超，逄洪波，王兰兰，等，2022. 高粱净光合速率和氮代谢关键酶活性对施氮量的响应及相关性分析[J]. 江苏农业科学，50（17）：82-89.

叶霞，刘潇，高敏，等，2022. 喷施有机酸和叶面肥对采收期火龙果果实品质的影响[J]. 南方农业学报，53（5）：1296-1304. [YE X, LIU X, GAO M, et al., 2022. Effects of spraying organic acid and foliar fertilizer on fruit quality of pitaya at harvesting period [J]. J S Agric, 53(5): 1296-1304.]

袁野，吴凤芝，周新刚，2009. 光氮互作对番茄果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学，42（4）：1331-1338. [YUAN Y, WU FZ, ZHOU XG, 2009. Interactive effects of light intensity and nitrogen supply on sugar accumulation and activities of enzymes related to sucrose metabolism in tomato fruits [J]. Sci Agric Sin, 42(4): 1331-1338．]

杨治平，陈明昌，张强，等，2007. 不同施氮措施对保护地黄瓜养分利用效率及土壤氮素淋失影响[J]. 水土保持学报，21（2）：57-60. [YANG ZP, CHEN MC, ZHANG Q, et al., 2007. Effects of different fertilizer measurement on nutrient utilization in cucumber and nitrate leaching loss from soil in greenhouse [J]. J Soil Water Conserv, 21(2): 57-60.]

张亚飞，罗静静，彭福田，等，2017. 肥料袋控缓释对桃树根系生长、氮素吸收利用及产量品质的影响[J]. 中国农业科学，50（24）：4769-4778. [ZHANG YF, LUO JJ, PENG FT, et al., 2017. Effects of fertilizer being bag-controlled released on root growth, nitrogen absorption

and utilization, fruit yield and quality of peach trees [J]. Sci Agric Sin, 50(24): 4769-4778.]

张中峰，尤业明，黄玉清，等，2012. 模拟岩溶水分供应分层的干旱胁迫对青冈栎光合特性和生长的影响[J]. 生态学杂志，31（9）：2197-2202. [ZHANG ZF, YOU YM, HUAGN YQ, et al., 2012. Effects of drought stress on the photosynthesis and growth of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings: A study with simulated hierarchical karst water supply [J]. Chin J Ecol, 31(9): 2197-2202.]

ALLEYNE V, CLARK JR, 1997. Fruit composition of ‘Arapaho’ blackberry following nitrogen fertilization[J]. Horticul Sci, (2): 282-283.

BRUNETTO G, CELIA C, MIOTTO A, et a1., 2017. Fruit yield and composition in orange trees cv ‘Lane Late’ in response to nitrogen fertilization in sandy typic hapludalf soil[J]. Ciênc Rural, 47(3): 1-7.

DUARTE PJP, LARSSON CM, 1993. Translocation of nutrients in N-limited, non-nodulated pea plants[J]. J Plant Physiol, 141(2): 182-187.

He ZL, CALVERT DV, ALVA AK, et a1., 2003. Thresholds of leaf nitrogen for optimum fruit production and quality in grapefruit[J]. Soil Sci Soc Am J, 67(2): 583-588.

LI YY，HUANG LH，ZHANG H，et al., 2017. Assessment of ammonia volatilization losses from saline-sodic soils and nitrogen utilization during rice growing season[J]. Sustainability, 9:132-147.

NGUYEN H, HOFMAN P, HOLMES R, et a1., 2004. Effect of nitrogen on the skicolour and other quality attributes of ripe ‘Kensington Pride’ mango (*Mangifera indica* L.) fruit [J]. J Horticul Sci, 79(2): 204-210.

QIN W, ASSINCK FBT, HEINEN M, et al., 2016. Water and nitrogen use efficiencies in citrus production: a meta-analysis[J]. Agric Ecosyst Environ, (222): 103-111.